

МОДИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ КОРОТКОИМПУЛЬСНОГО ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

С.К. Павлов, Ф.В. Конусов, В.А. Тарбоков, Г.Е. Ремнев
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
ул. Ленина 30, Томск 634050, Россия,
lab.sergey@gmail.com, konusov@tpu.ru, tarbokovv@tpu.ru, remnev@tpu.ru*

В докладе представлен обзор результатов работ по влиянию импульсного ионного облучения на оптические и электрофизические свойства тонких пленок полупроводников и диэлектриков. Объектом исследований являлись материалы – композит Al–Si–N, нитрид титана и оксид галлия. Тонкие пленки были синтезированы методом реактивного магнетронного распыления. Облучение осуществлялось импульсным мощным ионным пучком на ускорителе ТЕМП-4М с параметрами: состав пучка – ионы углерода и протоны, энергия ионов до 200 кэВ, длительность импульса ~100 нс, плотность тока варьировалась в различных экспериментах и составляла до 20-30 А/см². В докладе представлены данные о влиянии облучения на микроструктуру и электронную структуру материалов, исследованные структурными, оптическими и электрофизическими методами. Обсуждается радиационная стойкость материалов в условиях импульсного интенсивного ионного облучения, сопровождающегося сверхбыстрым нагревом и охлаждением. Показана возможность модификации оптических и электрофизических функциональных характеристик исследованных материалов.

Ключевые слова: радиационные дефекты; Al-Si-N; оксид галлия; нитрид титана; тонкие пленки; импульсное ионное облучение.

MODIFICATION OF OPTICAL AND ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF THIN FILMS BY SHORT-PULSE ION IRRADIATION

Sergey Pavlov, Fedor Konusov, Vladislav Tarbokov, Gennady Remnev
*National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenina Ave., 634050 Tomsk, Russia,
lab.sergey@gmail.com, konusov@tpu.ru, tarbokovv@tpu.ru, remnev@tpu.ru*

The report presents an overview of the results of studies on the effect of pulsed ion irradiation on the optical and electrophysical properties of thin films of semiconductors and dielectrics. The objects of the study were the following materials: Al–Si–N composite, titanium nitride and gallium oxide. Thin films were synthesized by reactive magnetron sputtering. Irradiation was carried out by a pulsed powerful ion beam on the TEMP-4M accelerator with the following parameters: beam composition - carbon ions and protons, ion energy up to 200 keV, pulse duration ~100 ns, current density varied in different experiments and amounted to 20-30 A/cm². The current density was limited to ablation/delamination threshold. The report presents data on the effect of irradiation on the microstructure and electronic structure of materials, studied by X-ray diffraction analysis, Raman spectroscopy, optical absorbance spectroscopy, photoluminescence, electrical and photoelectrical measurements. Radiation resistance of materials under conditions of pulsed intense ion irradiation, accompanied by ultrafast heating and cooling is discussed. The possibility of modification of the optical and electrophysical functional characteristics of the studied materials is shown.

Keywords: radiation defects; Al-Si-N; gallium oxide; titanium nitride; thin films; pulsed ion irradiation.

Введение

Использование субмикросекундных мощных ионных пучков (МИП) для модификации свойств материалов достаточно хорошо зарекомендовало себя для различных классов материалов [1]. Варьируя параметры воздействия МИП можно выделить основные способы модификации как:

модифицирование поверхностного слоя путем сверхскоростной закалки, плавление и сверхбыстрая рекристаллизация с образованием микро- и наноструктур, импульсная имплантация ионов в сопровождении энергетического воздействия и осаждение тонких пленок из абляционной плазмы. Вместе с тем, возможен и гибридный под-

ход к модификации свойств материалов МИП + PVD/CVD, в котором задачами МИП может являться: создание рельефа поверхности; очистка подложки и активация поверхности для улучшения адгезии покрытия; создание градиента микроструктуры/свойств; синтез новых фаз посредством ионного перемешивания (атомами отдачи или в жидкофазном механизме). Возможен и обратный подход – PVD/CVD + МИП, где задачей МИП является модификация структуры и свойств материала покрытия.

В настоящей работе представлен обзор результатов по использованию МИП с параметрами: состав пучка – ионы углерода и протоны, энергия ионов до 200 кэВ, длительность импульса ~100 нс, плотность тока варьировалась в различных экспериментах и составляла до 20–30 А/см². Данный режим многократного короткоимпульсного ионного облучения характерен тем, что доминирующими становятся процессы генерации радиационных дефектов и их сверхбыстрой термической релаксации за счет импульсного нагрева/охлаждения (до ~10⁹ К/с). Это открывает путь к направленному управлению дефектной структурой (defect engineering) дефектных тонких пленок, осажденных методом магнетронного распыления, в том числе на легкоплавкие подложки, с целью модификации их функциональных оптических и электрофизических свойств. Параллельно, исследование воздействия МИП в заданных режимах являлось прямым тестом радиационной стойкости функциональных тонкопленочных материалов к экстремальным импульсным радиационно-термическим нагрузкам.

Методика эксперимента

Объектами исследования являлись тонкие пленки AlN и аморфного a-SiN_x, нанокompозита Al-Si-N (10 и 30 ат.% Si), нитрида титана (TiN) и оксида галлия (β-Ga₂O₃ и аморфный a-GaO_x), синтезированные реактивным магнетронным распылением. Облучение проводилось на ускорителе

ТЕМП-4М ионами углерода и протонов в режиме короткоимпульсного ионного облучения (КИИИ), с плотностью тока ниже порогов абляции и отслаивания. Комплексная характеристика материалов (рентгеноструктурный анализ, Рамановская спектроскопия, оптическая спектроскопия поглощения, фотолюминесценция, электро- и фотоэлектрические измерения) выявила закономерности модификации свойств, обусловленные конкуренцией радиационного дефектообразования и сверхбыстрого отжига в импульсе МИП.

Результаты и их обсуждение

Ключевыми результатам модификации свойств нанокompозитных пленок Al-Si-N являлось повышение прозрачности в области видимого спектра при определенных флюенсах МИП. Так, например, облучение Al-Si-N (30 ат.% Si) в режиме КИИИ приводит к значительному (до 10%) повышению коэффициента пропускания в видимой области спектра (450–770 нм) (рис. 1).

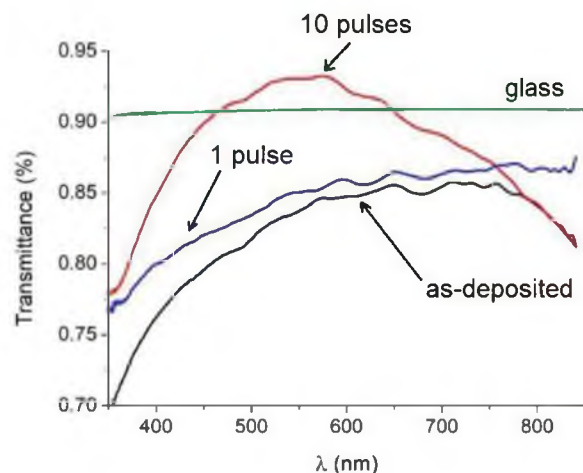


Рис. 1. Спектры светопропускания покрытий Al-Si-N толщиной 2.3 мкм до облучения и после облучения одним и десятью импульсами КИИИ. Для сравнения приведен спектр пропускания кварцевого стекла [2]

Облучение пленок TiN продемонстрировало двухстадийную модификацию оптических и электрических характеристик в зависимости от плотности тока пучка. Показана возможность изменения механизма (активационный / прыжковый) и типа проводимости (рис. 2) тонких пленок [3]. При

этом были использованы в том числе режиме с частичной абляцией материала.

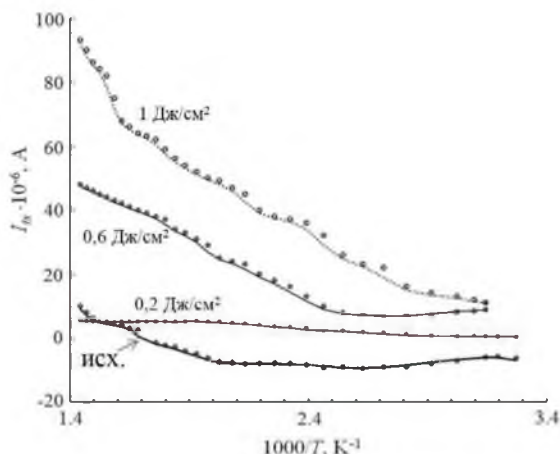


Рис. 2. Температурные зависимости термостимулированных токов покрытий TiN до и после облучения МИП с различной плотностью тока (плотностью энергии) [3]

Результаты по модификации фотоэлектрических свойств получены для пленок Ga₂O₃. Показано, что КИИИ облучение кристаллического β-Ga₂O₃ может приводить к существенному (в 2,5-100 раз) ускорению релаксации фотопроводимости и падению величины темнового тока. Для аморфных пленок α-GaO_x КИИИ облучение индуцирует формирование фотопроводимости и может приводить к увеличению коэффициента УФ-С фоточувствительности до 10 раз по сравнению с исходным состоянием. Эти эффекты обусловлены формированием дефектных комплексов, управляющих процессами генерации, рекомбинации и транспорта носителей заряда.

Проведение экспериментов с высоким числом импульсов КИИИ при облучении Al-Si-N, TiN и Ga₂O₃ позволило оценить радиационную стойкость покрытий в условиях многократного экстремального радиационно-термического воздействия.

Закключение

Показано, что контролируемое воздействие КИИИ ниже порога разрушения тонких пленок позволяет направленно модифицировать их дефектную структуру за счет комбинации радиационного повреждения и сверхбыстрого термического отжига в каждом импульсе. Это эффективно изменяет ключевые функциональные свойства: оптическое пропускание (Al-Si-N), электропроводность (TiN), фотопроводимость и фоточувствительность.

Таким образом, метод КИИИ перспективен для пост-депозиционной обработки функциональных тонких пленок.

Библиографические ссылки

1. Ремнев Г.Е., Тарбоков В.А. Павлов С.К., Модифицирование материалов при воздействии мощных ионных пучков. *Физика и химия обработки материалов* 2021; (2): 5-26.
2. Remnev G., Tarbokov V., Pavlov S., Konusov F., Zenkin S. and Musil J. Irradiation of sputtered Al-Si-N coatings by pulsed 200 keV C⁺ ion beam. *Vacuum* 2018; 158: 65-67.
3. Konusov F., Pavlov S., Lauk A., Kabyshev A., Novikov V., Gadirov R., Tarbokov V., Remnev G. Effect of short-pulsed ion irradiation on the optical and electrical properties of titanium nitride films deposited by reactive magnetron sputtering. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 2022; 526: 51-59